



# 遠隔操縦油圧ショベルの機体挙動予測に基づく転倒防止システムに関する研究

著者	重松 康祐
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
発行年	2018
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8527号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00152399">http://hdl.handle.net/2241/00152399</a>

遠隔操縦油圧シヨベルの  
機体挙動予測に基づく  
転倒防止システムに関する研究

システム情報工学研究科

知能機能システム専攻

重松 康祐

# 概要

## 背景および目的

土砂災害等の二次災害の恐れがある災害現場の初動対応において、遠隔操縦の油圧ショベルが投入されている。このような対応では、有人操縦では行うことができないような急傾斜地での作業が求められることも多い。そのような場所では作業装置を不用意に操作すると、重心位置の変化や慣性力による影響で転倒の恐れがある。有人操縦では、車体の傾斜、加速度や周囲の地形を搭乗者が瞬時に認識できるため、転倒の危険が伴うような動作を回避することができる。一方、遠隔操縦では、ショベルを直接目視するか、カメラ画像を頼りにせねばならず、必ずしも機体の情報や周囲の地形を正確に認識できないため、転倒の危険性を判断するのは実機搭乗時ほど容易ではない。また、カメラ画像や操縦信号には、通信遅延が生じるため、転倒の危険をカメラ画像から判断できても、転倒回避操作が手遅れとなる可能性が高い。前述した遠隔操縦による情報の欠如を補償する方法として、バーチャルリアリティ技術を活用して遠隔操縦者に機体の状態や周囲の状況を提示するシステムが開発されている。しかし、専用の座席やディスプレイ等の機材が大規模になり、災害の初動対応で求められる迅速な機材展開が困難である。また、通信遅延の問題は残る。一般的な遠隔操縦油圧ショベルでは、遠隔操縦者は、カメラ画像に基づき、転倒の危険回避に常に注意を払いながら操縦を行う。しかし、カメラ画像による危険性判断の困難性や通信遅延の影響により、遠隔操縦者が油圧ショベルの転倒を回避することは難しいと考えている。また、操縦信号は直接アクチュエータに与えられるため、操縦者の不用意な操作や誤操作により機体が転倒する恐れがある。そこで、遠隔操縦者に頼らず、遠隔操縦ショベル側での転倒防止制御によって、これらの問題を解決しようと考えた。これは、遠隔操縦者の操作指令に対する将来の機体の運動を予測することで、将来の転倒危険性を機体が動き出す前に予測し、転倒の危険性がある場合には操作入力を転倒しない範囲へ修正して未然に転倒を防ぐものである。本提案手法は、転倒しない範囲の操作入力しかアクチュエータに与えないので、遠隔操縦指令やカメラ画像に遅延があっても本制御に影響を与えない。

油圧ショベルは、移動マニピュレータの一種とみなすことができる。移動マニピ

レータにおいては、以前から転倒防止制御に関する研究が行われてきた。これらの手法は、転倒の危険があると判断される不安定な状態に陥った場合に、マニピュレータの運動により安定性を回復する手法と事前に安定なマニピュレータの軌道を計画する手法に大別される。前者の手法を適用する場合、油圧ショベルの動作指令に対する応答性はモータに比べて遅いため、これら手法を油圧ショベルに適用した場合、モータ駆動の移動マニピュレータと比較し、安定性を回復できる状況は限定的であると考ええる。また、遠隔操縦では、操縦者の意に反してまで安定回復のための動作を行うことは、地上物体との衝突回避の問題なども考慮しなければならず、また操作性の観点からも望ましくないと考える。これらのことから、遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止には、安定性の回復動作を行うというアプローチではなく、機体を不安定な状態に陥らせないというアプローチが適していると考えている。一方、事前に安定なマニピュレータの軌道を計画する手法は、遠隔操縦者が操縦する遠隔操縦油圧ショベルには適用できない。油圧ショベルにおいて、ZMPをリアルタイムで算出し、遠隔操縦者に提示することで転倒を防ごうとする手法が提案されている。また、動いている作業装置を止める時、転倒の恐れがあれば自動的に緩停止させることで転倒を防ぐ手法がすでに提案されている。一方本研究では、動き出す直前に、操作指令値を基に近い将来の機体挙動と転倒危険性を予測し、転倒の未然防止を考えて、リアルタイムの計測による計算よりもさら先立ってその予測をしたいと考える。また、本研究は任意の操作入力に対する機体の転倒危険性を予測することで、作業装置停止時だけでなく、任意の油圧ショベルの状態に対して作業装置動作に伴う慣性力や重心の変化による転倒の防止を図ることができる。

## 油圧ショベルのモデル化

### 簡便な油圧ショベル動作モデルの構築

遠隔操縦者の操作入力に対する転倒危険性を予測するためには機体の挙動を予測する必要がある。機体挙動の予測のため、油圧ショベルのモデル化が必要である。前述のとおり、油圧ショベルの精密な物理モデルを構築することは不可能ではないが、これらの様な物理モデルを用い、将来の油圧ショベルの運動を高周期にシミュレーションできるほど高性能な計算機を油圧ショベルに搭載することは不可能ではないが現実的ではない。また、多様な油圧ショベルに本手法を適用することを考えた場合、同定すべきパラメータはそれほど多くないことが望ましい。そこで、本研究では高周期に計算可能なアクチュエータの簡易な動作モデルを構築する。先行研究を参考にし、操作入力に対するアクチュエータの速度応答を2次遅れ系としてモデル化した。このモ

デルを用いることで操作入力に対する将来のアクチュエータの動作および機体挙動の高速な予測が可能となった。

## 検証用シミュレータ

転倒防止システムの効果を検証するためには、油圧ショベルの機体の転倒を模擬する必要があるが実機を用いた実験は、安全性やコストの面において現実的ではない。そのため、実機の挙動を再現するシミュレーションモデルの構築を行った。油圧ショベルのモデル化にあたり、実機の油圧ショベルのブームおよび旋回動作動作特性を取得する予備実験を行った。予備実験の結果より、油圧ショベルの姿勢の変化に応じて油圧ショベルの速度応答が変化することが分かった。ブーム動作時は、重力によりブームシリンダに応じてシリンダ速度の定常速度が特に大きく変化し、旋回時は旋回軸周りの慣性モーメントに応じて加減速度が大きく変化することが確認できた。シミュレータとして Matlab/Simulink と V-rep を併用して油圧ショベルの油圧システム、キネマティクス、ダイナミクスをモデル化し、実機の挙動および転倒を再現するシミュレーション環境を構築した。

## 機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システム

本研究では、油圧ショベル自体の作業装置の動作によって転倒する場合を対象とし、掘削などの作業に伴うバケットと地面との衝突や掘削反力による転倒については対象としないものとする。このような前提条件の下では、油圧ショベルが転倒するケースは以下の2つが考えられる。

- ・ケース1 作業装置動作に伴う慣性力による転倒
- ・ケース2 作業装置動作に伴う重心位置変化による転倒

ケース1は、転倒危険性のある慣性力を作業装置の動作により発生させないように操作入力を自動調整することで防ぐことができる。つまり、この操作入力の自動調整により、作業装置動作時の加速度を機体の転倒が生じない範囲に制限するものとなっており、加速度を滑らかにするものである。ケース2は、転倒危険性のある重心位置となる姿勢になる前に自動停止させることで防ぐことができる。これは、油圧ショベルの姿勢に制限を与えるものである。これらケース1及びケース2に対する対応である操作入力の自動調整及び自動停止を組み合わせることで、動作時の加速度と姿勢が制限され、静的及び動的な転倒を防ぐことが期待できる。自動調整プロセスは、遠隔操縦者が与えた操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の ZMP に基づき動的に安定な範囲に調整された操作入力をアクチュエータに与えることで、動的に安定な

機体状態を保つ。自動停止プロセスは、操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の重心の鉛直床面投影点を予測し、転倒危険性を判断する。そして、転倒の危険がある場合には、予測した将来の重心の鉛直床面投影点及び ZMP に基づき静的及び動的に機体を安定に保ちながら作業装置を自動停止させる。自動停止プロセスによるアクチュエータに対する入力は、自動調整プロセスよりも優先させることで、自動的かつ安全に作業装置を停止させることができる。転倒危険性の予測や操作入力修正の計算時間は、アクチュエータの動作までの遅延時間や通信遅延時間に比べて非常に短い時間であることが期待できるため、転倒の防止を妨げる程の悪影響はないと考えられる。提案するシステムの効果の検証のため、模型車両を用いた実験を行い、本手法により転倒を防ぐ効果を確認した。

## 機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システム

提案した機体 ZMP および重心の予測に基づく転倒防止システムは、ZMP および重心の鉛直床面投影点が支持多角形内に留めることで機体を安定に保つものであるため、慣性力による機体の傾斜を一切許容しないものである。しかし、実際には機体が浮き上がっても機体が即時に転倒するとは限らない。機体が転倒しない範囲で機体の傾斜を許容することで動作可能な範囲の拡大や機体の動作速度を向上させることができる。考えた。アクチュエータの動作による機体の一部の浮き上がりを予測し、機体が浮き上がった後の転倒危険性を予測する。遠隔操縦者の操作入力から予測した転倒危険性が許容値以下となる操作入力に修正してアクチュエータに与える。これにより、動的および静的に安定な機体の状態を維持する操作入力のみをアクチュエータに与えることができる。転倒危険性の指標として正規化エネルギー安定余裕を用いた。正規化エネルギー安定余裕は、0 より小さくなると転倒することを意味する。そのため、本システムでは正規化エネルギー安定余裕があるマージン以上を維持するように操作入力を修正する。このマージンを一定値にすることで、機体の姿勢や転倒の方向によらず機体を転倒させるのに必要なエネルギーのマージンを一定にすることができる。本手法は、任意の油圧ショベルの状態に対してあらゆる操作入力を与えたときの将来の正規化エネルギー安定余裕を予測し、予測した正規化エネルギー安定余裕がしきい値以上かつ遠隔操縦者の操作入力に近い値を選択する。そのように操作入力を選択することで、転倒を防ぎつつ、遠隔操縦者の操作性をできるだけ低下させないことを目指すものである。油圧ショベルは、旋回やブームなど複数のアクチュエータを持っており、操作入力の組み合わせも膨大である。CPU による繰り返し処理により、実時間ですべての操作入力の組み合わせに対する将来の正規化エネルギー安定余裕を計算する

のは難したため、GPUを用いた並列計算により処理することにより実時間での処理を行う。提案するシステムの効果の検証のため、シミュレーション環境を構築し、本手法により転倒を防ぐ効果を確認した。

## 結論

本研究では、遠隔操縦油圧ショベルが自身のアクチュエータの動作による転倒を防ぐシステムを提案した。本手法は、操作入力に対する将来の転倒危険性を事前に予測し、転倒の危険がある場合には操作入力を修正することで転倒を防ぐものである。本研究の成果として、以下の結果を得た。

- ・操作入力に対する油圧ショベルのアクチュエータの速度応答を簡便にモデル化した。これにより、操作入力に対する油圧ショベルの挙動を高速にシミュレーションすることが可能となった。

- ・機体 ZMP および重心の予測に基づき転倒を防止するシステムを提案した。このシステムにより、機体の ZMP および重心を支持多角形に留め、機体を安定状態に保つことができる。模型車両による実験により、本手法により転倒を防ぐことができることを確認した。

- ・機体の浮き上がりを考慮した正規化エネルギー安定余裕の予測に基づく転倒防止システムを提案した。このシステムにより、機体の浮きあがり後の正規化エネルギー安定余裕を予測し、正規化エネルギー安定余裕を許容値以上に留めることで機体を安定状態に保つことができる。また、本手法は複数のアクチュエータの同時動作に対応し、GPUを用いた並列計算により実時間処理が可能であることを示した。シミュレーションにより、本手法により多くのシチュエーションで転倒を防ぐことができることを確認した。

本研究では、過去取り組まれた例が少ない災害現場に投入される油圧ショベルの転倒を防止するシステムについて検討を行い、模型実験およびシミュレーション実験で提案手法の有効性を示した。本研究により災害現場等の急傾斜地において機体を安定状態に保つ技術の向上に貢献したものであると考える。